

学校编码: 10384
学号: X2005182016

分类号__密级__
UDC__

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于 Si 衬底 Ge 量子点
光纤通信用光电探测器研制

Si-base Ge Quantum-Dots Photodetector
Used in Fiber Communication Field

汪建元

指导教师姓名: 孙道恒 教授

李 成 教授

专 业 名 称: 仪器仪表工程

论文提交日期: 2009 年 月

论文答辩时间: 2009 年 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2009 年 06 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密（ ），在 ____ 年解密后适用本授权书。
2. 不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

整合光纤通信的低损耗宽频带大容量低成本的优势与 Si 基质材料的成熟工艺技术和低廉制作成本优势，研制 Si 衬底 Ge 量子点光纤通信光电探测器，将为超大规模光电集成通信及未来光子通信做好准备，造福人类。

本论文在超高真空化学气相沉积 (UHV/CVD) 生长设备上，采用自组装 S-K (Stranski-Krastanov) 先层后岛生长方法，系统的研究了单层 Ge 量子点生长条件，得到了单层 Ge 量子点生长的最优条件：温度 $T=550^{\circ}\text{C}$ ；时间 $t=5\text{min}$ ； GeH_4 流量 $=1\text{sccm}$ 。进而优化设计多层结构生长条件，成功的在 Si 基上制备了 PIN 结构多层 Ge 量子点探测器材料。采用传统的 Si 半导体工艺，通过 3 次（版）光刻，摸索了光刻胶 (AE5214E) 的曝光显影时间。分别进行了 ICP 干法刻蚀台面，湿法腐蚀 SiO_2 引线空和 Al 接触电极。采用 PECVD 淀积了 SiO_2 ，采用磁控溅射淀积了 Al 接触电极。最后通过器件封装完成了器件的制备。之后对研制的器件进行了 I-V 特性、暗电流、光谱响应特性及针对光纤通信 $1.33\mu\text{m}-1.55\mu\text{m}$ 红外波段的光电响应进行了测试。从测试结果看可以判断器件的功能与设计基本相符，器件具有较理想的暗电流特性（-1V 偏压下为 $7.35\text{E}-6\text{ A/C m}^2$ ）。唯一不足的是光谱响应特性及 $1.33\mu\text{m}-1.55\mu\text{m}$ 波段的光电响应测试中，得到响应度偏小， 0.0014mA/W （-4V 偏压下），说明生长材料中 Ge 组分较低有关。最后总结了研制 Ge 量子点光电器件过程中的经验，提出了改进器件性能的措施，为下一步工作指明方向。

关键词：UHV/CVD 系统； Si 基 Ge 量子点； 红外光电探测器

Abstract

The advantages of fiber communication system is huge-capacity, low-cost, broad-band and low-loss , also the Si-based semiconductor devices have the advantages of mature production technology and low production costs. How to integrate the advantages of both? Developing Si-base Ge Quantum-Dots photodetector used in fiber communication field is the right way. It will prepare for ultra-large-scale optoelectronic integrated communications and future photonic communication. After all it will benefit the mankind.

Ultra-High Vacuum Chemical Vapor Deposition (UHV/CVD) System is adopted in this thesis to make a study of Ge quantum dots which is grown on the Si-based with the thermodynamic and kinetic theory of S-K growth model. After a systematically study, We got the optimal conditions for single-layer growth of Ge quantum dots: Temperature $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$; time $t = 5\text{min}$; GeH_4 flow = 1sccm. Then got the optimal growth conditions for multi-layer structure. Finally we successfully developed multi-layer PIN structure Ge quantum dots detector material on Si-based. We adopt the traditional semiconductor technology to develop the semiconductor raw material into semiconductor devices. From material cleaning to the device package, lithography with “I”, “II” and “III” Mask version are carried out. SiO_2 insulation layer and Al electrode are deposited with dry and wet etching reformation of material surface. At last we do the test work: Electrical performance and spectral response of the device are measured. Especially the Photoelectric response test for the Optical Fiber Communication Band ($1.33\mu\text{m}$ – $1.55\mu\text{m}$). From the test, we can see that: The functions of the device in line with the basic design; Devices with better characteristics of dark current (0.043mA/W -3V bias); due to low Ge-component materials the device show a low Responsiveness as 0.0014mA/W -4V bias in the Photoelectric response test for the Optical Fiber

Communication Band (1.33 μ m-1.55 μ m). In the end ,the author summarize the experience in the development of the Ge quantum dots optoelectronic devices. and put forward measures to improve the device performance to direct the further work.

Keywords: UHV/CVD system; Si-based Ge Quantum-dots;
Infrared Photodetector

目 录

第一章 引 言	1
1.1 光纤通信简介	2
1.2 通信红外光电探测器介绍	5
1.3 本论文主要工作	12
第二章 器件材料生长	13
2.1 Ge 量子点生长方法	13
2.2 Ge 量子点生长条件	21
2.3 器件材料结构设计及生长	30
2.4 本章小结	33
第三章 器件制备工艺	34
3.1 器件版图设计	34
3.2 器件制备工艺	36
3.3 本章小结	49
第四章 器件性能测试	50
4.1 I-V 特性测试与分析	50
4.2 光谱特性测试与分析	51
4.3 1.33um 和 1.55um 光电响应测试与分析	53
4.4 本章小结	58
第五章 总结及展望	59
5.1 实验总结	59
5.2 未来展望	60
参考文献	61
附录	63
设计图纸	65
致谢	68

厦门大学博硕士论文摘要库

CONTENT

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction of the optical fiber communication	2
1.2 Introduction of the Infrared Photodetector	5
3 Summary.....	12
Chapter 2 Growth of the device material	13
2.1 Introduction of Ge quantum dots Growth	13
2.2 Growth of Ge quantum dots	21
2.3 Structure Design and Growth of device material	30
2.4 Summary.....	33
Chapter 3 Fabrication technology for the device	34
3.1 Lithography mask design.....	34
3.2 Fabrication technology for the device.....	36
3.3 Summary.....	49
Chapter 4 Measurement and analysis for device	50
4.1 I-V characteristics.....	50
4.2 Photocurrent spectra	51
4.2 Test for the Optical Fiber Communication Band	53
4.3 Summary.....	58
Chapter 5 Summary and prospects	59
5. 1 Summary	59
5. 2 Prospects	60
References	61
Appendix	63
Drawing.....	65
Acknowledgement	68

第一章 引言

半导体材料独特的性能成就了各式各样改变着我们生活的集成器件。特别是作为微电子基质材料的半导体硅(Si)，作出了巨大的贡献。Si 具有①强度大、没有机械滞后现象；②良好的导热性能、小的热膨胀系数；③易于氧化，形成 SiO_2 绝缘层；④储量大，提纯纯度高；⑤日臻成熟的加工工艺等，使它成为目前生产成本最低，研究最多最为系统，也是目前应用最为广泛的半导体(基底)材料。从身边的手机电脑芯片到航天航空的仪器仪表都有 Si 的踪影。无论从制作工艺的成熟性还是性能价格比的角度来说，Si 在日常生活和信息高科技领域中都独领风骚，其不可替代的地位是日益明显。

目前光纤为信息化社会信息传递的高速公路，光纤通信的发展不断的提升信息通信的速度和稳定性。光纤通信优势明显：①频带宽、信息容量大；②传输损耗低，传输距离远；③制作光纤的原材料资源丰富；④光纤作为信道具有体积小，质量轻的优点，便于通信线路的敷设；⑤光纤通信系统的抗干扰能力强使用安全等。现在通信的主干线全部采用光纤通信，在不远的将来，随着信息通信量的飞速增大，光纤入户将势在必行。

因此如何将 Si 材料的优势与光纤通信的优势结合起来，制备高性能，高速，易于集成化的廉价光电探测器成为国内外的研究热点。但是由于 Si 在室温下禁带宽度 E_g 为 1.12eV，理论响应截止波长为 1.1 μm ，限制了其在光纤通信波段(1.31 μm 和 1.55 μm)光电探测器的应用。

近年来，在使用 SiGe/Si 应用能带工程来实现新功能以弥补 Si 常规器件不足过程中，研究人员发现：在 Si 基上以 Stranski-Krastanov(S-K)模式生长无位错的自组装 Ge 岛(点)因其结构上的三维限制特性，在光学和电学上表现出特有的性质，拓宽了 Si 基器件在光学领域中的应用。Si 基 Ge 量子点光电探测器是能够实现光纤通信波段 1.31 μm 和 1.55 μm 的响应。且和量子阱探测器比较，Ge 量子点探测器由于三维的量子限制作用，具有暗电流小，光生载流子寿命长，对正入射光敏感等优点，受到了国内外的重视^[1]。

1.1 光纤通信简介

用光来传递信息是一种古老的通信方式，中国古代的狼烟就是一个典例。光纤出现以来，现在的光通信在过去的 20 多年中，以惊人的速度发展。在信息量爆炸性增长的今天，光纤通信无可争议的成为信息传递的主干线。最早的商用光纤系统于 1977 年在美国的芝加哥和加利福尼亚州的圣莫尼卡之间开通。我国的光纤通信发展史可参见表 1-1。自从上世纪 90 年代开始引入光纤通信，到 2006 年 6 月 30 日，我国六大基础电信运营商所用光缆长度达 432.2 万公里，所用光纤约 8072 万公里^[2]，足以预见在不远的将来光纤的覆盖范围将更广，光纤入户将成为趋势。

表 1-1 我国光纤通信传感技术发展史^[3]

时间	代表事件	主要参与单位
20 世纪 70 年代末—80 年代初	在杭州召开了“光纤电流，电压传感器方案论证会”，开创了我国研究光纤传感器技术的新纪元	国家科委技术局
1983 年—1985 年	进行有关光纤传感器的研制工作	国内部分高校和研究单位
1985 年 11 月	在南京成立了光纤传感专业委员会	清华大学
“七五”期间	提出了 15 项光纤传感技术科研项目，为在我国形成一个新兴的光纤传感器的产业打下基础	国家科委技术局
“八五”期间	在其《八五》攻关重点项目《激光技术》中光纤传感列为《激光检测》三大研究内容之一，具体的项目是：“高精度光纤油罐检测系统”，这是我国第一套在现场试用的多点，多参量光纤传感网络系统；国家基金开始支持光纤传感技术的研究	国家科委新技术局，清华大学，中科院声学所，大连理工大学物理系，重庆大学光电系，武汉理工大学，燕山大学
20 世纪 90 年代	光纤传感技术的发展进入了一个高潮	各光纤技术的研究单位
进入 21 世纪以来	开始了光纤传感技术蓬勃发展的新时期	众多高校，研究单位及光电器件制造商

光纤通信技术是当代通信技术发展的最高成就，已成为现在通信的基石。光纤通信得到如此飞速的发展，主要是因为它具有一系列独特的优点：

①频带宽，信息容量大。现在单模光纤的宽度可达到THz-km量级，极大地扩大了通信容量。光纤还具有极宽的潜在宽度。石英光纤的低损耗区在 $\lambda=1.45\sim 1.65\mu\text{m}$ 的波长范围内，频带宽度为25THz。如此巨大的宽度，即使开发一小部分也将从根本上改变通信产业的面貌。

②传输损耗低，传输距离远。主干线的单模光纤通信采用 $1.31\mu\text{m}\sim 1.55\mu\text{m}$ 红外波段，因为最低光纤传输损耗已降至0.2dB/km以下，这是以往的任何传输线所不能与之相比的。由于光纤的传输损耗低，因此光纤通信系统中的无中继传输距离长。在强度调制直接检测（IM-DD）光纤通信系统中的无中继传输距离长。在强度调制直接检测（IM-DD）光纤通信系统中，无中继传输距离可达几十到上百千米，而相干通信的无中继传输距离可超过200km，这与电缆通信相比要大1~2个数量级。

③制作光纤，光缆用的原材料资源丰富。制作光纤的主要原材料是 SiO_2 ，它是地球上储藏最丰富的物质。而电通信中使用的是通信电缆，其主要原材料是金属铜和铝，其资源严重缺乏。因此，光纤通信系统使用光纤作为信道，可以节省大量的铜和铝，1km的光纤线路可以节省150吨铜和500吨铝。

④光纤作为信道具有体积小，质量轻的优点，便于通信线路的敷设。例如，一条12芯的光缆直径为12mm，质量约为90g/m，由于光纤，光缆线径细，可绕性好，因此便于敷设，可直埋，可架空，也可插入已有的电缆管道，方便扩容，也特别适合于飞机，火箭，导弹，潜艇，轮船，人造卫星和宇宙飞船上使用。

⑤光纤通信系统的抗干扰能力强，使用安全。光纤是一种介质光波导，具有光波导封闭在其中进行传播的波导结构，不受电磁场干扰，可在强电磁场环境下工作，如在电力网或变电所内作为通信控制线路。光纤是石英介质波导，不打火花，且抗高温，抗腐蚀能力强，可在易燃易爆和有毒有害气体的环境下工作，如能在化工，厂矿等环境恶劣条件下工作。

目前光纤通信系统主要由光发送，光传递，光接收三部分组成（如图1-1）。光发送器中有光源，驱动器和调制器，它的功能是将要传输的语音，图片，数据等信号通过电端机加到光源上产生调制的光信号，并将其耦合到光纤中。光传递主要由光纤（光缆）和中继器组成。由光纤送来的光信号入射到光接收部分，那里的光检测器（探测器）将光信号接收，解调成电信号，然后进行电放大处理，还原成原来的信息。通过适当的接口设备，这样一个光传输单元可以和现有的数

字或模拟通信系统互联^[4]。

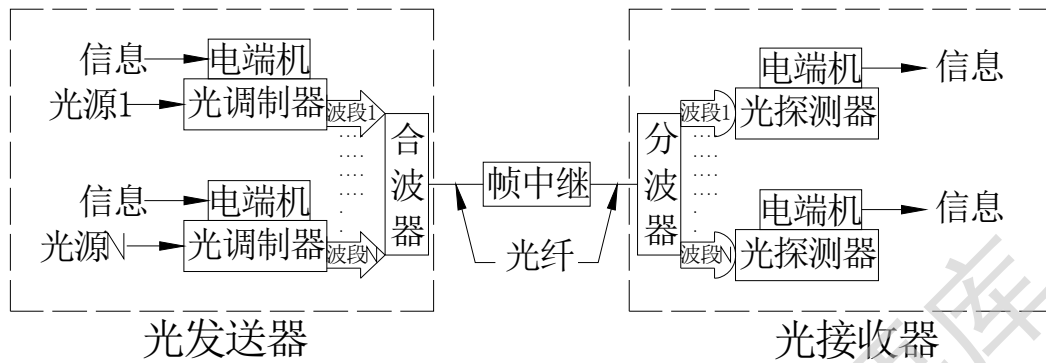


图 1-1 光纤通信原理示意图

一个完整的光通信系统，除了光纤之外，还必须有各种光学元件和光电子器件的支持。正是这些功能和技术不同的元器件的研制成功使得光纤通信系统发展到了今天的形态。光纤通信系统中的元器件大体可分为有源器件和无源器件两大类。光耦合器，光滤波器，光开关器，光衰减器和光隔离器等属于无源器件。而光源，光放大器，光检测器（探测器）等属于有源器件。有源器件的工作原理都是属于光与电的相互作用，它们是光电子器件的主体。本文将重点介绍光电探测器的工作原理和制作工艺。

光纤通信系统模块在与现有的电信号通信系统模块互联时需通过光电探测器（光检测器）进行光电信号转换环节，最终将信息以电信号的形式传输到信息使用终端。从本质上来说，现有的通信系统是电信号互联的通信系统。而电信号的传输速率与光纤信号传输速率相差有几个数量级；同时电信号的传输误码率远远高于与光纤信号传输误码率。电信号的传输成为通信系统中的瓶颈。随着 Si 基的广泛应用及 Si 基光互联^[5]的提出，研制新型的与 Si 基兼容的光电探测器将从根本上解决这个瓶颈问题。把光电探测器集成在以 Si 基为底材的大规模集成电路上。将把原来只作为主干线的光纤通信延伸到信息使用终端，最终实现光纤入户，实现光互联，从本质上提升现有通信系统的速度和稳定性。

1.2 通信红外光电探测器介绍

光电探测器是基于光电效应原理设计制作的。当光子（光信号）照射到电光物质（半导体材料）上，而且当光子的能量 $h\nu$ 大于带隙的能量（禁带宽度） E_g 时，光子被物质所吸收，并转换为一对电子和空穴对。这对电子—空穴对在外加电压所加电场作用下，就在半导体中渡越形成电流，称为光电流。从能级的观点看，在没有光照射的时候，处于反向偏压下（或 0 偏压）的光电二极管，它的 PN 结在平衡状态时，其能级如图 1-2 所示。当 PN 结加反向电压或 0 偏压时，由于外加电场的电压和空间电荷区的自建场的方向相同，使总的势垒增加，由于空间电荷区的载流子基本耗尽，称为耗尽区。

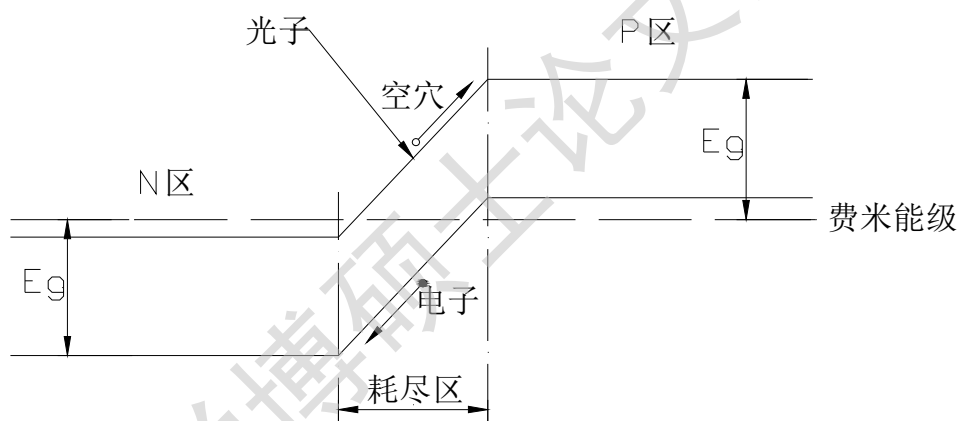


图 1-2 半导体光电二极管能级

当入射光照射到 PN 结上，且光子能量 $h\nu$ 大于半导体材料的禁带宽度 E_g 时，价带上的电子可以吸收光子而跃迁到导带，结果产生一对电子—空穴对。如果这对电子—空穴对产生于耗尽区内，那么它就在外电场的作用下形成光电流。其电流 I 的大小与入射的光功率 P ，其比值成为响应度 R 。响应度的单位为 A/W。

$$R = \frac{I}{P} \quad (1-1)$$

光子转换成电子—空穴对的比率称为量子效率 η ，可以写成

$$\eta = \frac{I/e}{P/h\nu} \quad (1-2)$$

式中 e 为电子电荷量。所以响应度和量子效率之间的关系为

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} \quad (1-3)$$

由此可见响应度是与波长有关的，在量子效率一定的条件下随着波长的增加，响应度也增加。但是当波长增加到光子能量低于半导体的带隙时，量子效率反而为 0。它的截止波长为

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad (1-4)$$

对于 Si 材料的禁带宽度 $E_g=1.12\text{eV}$ ，对应它的理论截止波长为 $1.11\mu\text{m}$

对于 Ge 材料的禁带宽度 $E_g=0.75\text{eV}$ ，对应它的理论截止波长为 $1.65\mu\text{m}$

但是，光电效应在波长的低端（短波长），虽然理论上能够产生，但由于光子在进入耗尽区以前，就被材料吸收了，以致于不能到达耗尽区，导致响应度降低。所以对于 Si 材料，它的响应波长从 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ ；对于 Ge 材料，它的响应波长从 $0.8\sim 1.65\mu\text{m}$ 。

目前常用的红外探测器主要可以分为三大类如下表 1-2。

表 1-2 常用的红外探测器

单位： μm

材料	名称	工作波段
VI 族与金属化合物	PbS 探测器	1.0-3.5
	PbSe 探测器	2.0-6.0
	HgCdTe 探测器	0.5-11
III-V 族半导体	InGaAs 探测器	0.5-2.6
	InAs 探测器	1.0-3.8
	InSb 探测器	1.0-5.5
IV 族半导体	Si 探测器	0.4-1.1
	Ge 探测器	0.8-1.8
	SiGe 合金探测器	0.4-1.8

光电探测器用于光纤通信系统作为光接收机，必须要达到相应的性能要求，首先从表现上要能正确的接收到达的信息，不产生误码，用误码率 BER 来判定其性能^[6]。误码率定义如下：

令 $P(1)$ 表示码流中出现“1”码的概率，令 $P(0)$ 表示码流中出现“0”码的概率，令 $(1/0)$ 表示将“0”码错判为“1”码的概率，令 $(0/1)$ 表示将“1”码错判为“0”码的概率。误码率 BER 可表示为：

$$BER = P(1/0)P(0) + P(0/1)P(1) \quad (1-5)$$

光纤通信的速率很高，允许的误码率 $BER < 10^{-10}$ 这么低的误码率对探测器的性能要求很高。一般对于光纤通信用探测器还有以下性能要求。

光纤通信用光电探测器性能要求（以目前使用的InGaAs为例）：

工作电压：3.3~5V；

响应速度：几个ps

峰值响应度： $>0.5 \text{ A/W}$

暗电流：2~5nA

工作温度： $-40^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$

1、响应度 是表征探测器能量转换效率的一个参数，定义为探测器产生的光电流与其入射的光功率之比。即

$$R = \frac{I}{P} = \frac{\lambda \eta}{1.24} \quad (1-6)$$

λ 为入射光波长， η 为器件量子效率。灵敏度高就意味着探测器能对一定的入射光信号功率转换并输出较大的信号电流。

2、响应频率（带宽） 探测器的响应速度是指它的光电转换速度。探测器应有足够快的响应速度或带宽，这就要求探测器尽可能以最小的失真将接收到的光脉冲信号转换为电脉冲信号，探测器的响应速度一般用脉冲响应时间表示。要使探测器快速响应：首先在结构上要减薄零场区，其次是减小结电容，再者，采用同轴封装和微带结构来减小管壳电容。

3、暗电流 探测器在极其微弱的光信号条件下工作。如果探测器引入的噪声电流过大，则数字光接收机就无法从噪声电流和电信号电流的混杂中有效地判决再生出有用的信号，导致通信无法正常进行。噪声我们也可以要伏安特性（暗电流测试）来判定。

4、温度特性 环境温度变化对探测器的性能影响很大，比如对APD探测器，温度变化会使其工作不稳定。从器件结构上看，耗尽区愈宽，受温度的影响愈大。探测器能正常工作的温度需与环境温度一致^[7]。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库